第 38 卷第 5 期 生 态 学 报 Vol.38,No.5
2018 年 3 月 ACTA ECOLOGICA SINICA Mar.,2018

DOI: 10.5846/stxb201611112299
钱婧,张丽萍,王文艳.红壤坡面土壤团聚体特性与侵蚀泥沙的相关性.生态学报,2018,38(5):1590-1599.
Qian J, Zhang L P, Wang W Y. The relationship between soil aggregates and eroded sediments from sloping vegetated red soils of South China. Acta Ecologica Sinica,2018,38(5):1590-1599.

红壤坡面土壤团聚体特性与侵蚀泥沙的相关性

钱 婧,张丽萍*,王文艳
浙江大学浙江省农业资源与环境重点实验室,环境与资源学院, 杭州 310058

摘要:借助室内人工模拟降雨试验为研究手段,以强降雨过程中红壤丘陵区坡菜地侵蚀泥沙颗粒组成及土壤团聚体稳定性变化特征与规律为研究目的,分别在不同坡长(2,3,4m)、不同植被覆盖度(0,30%,60%,90%)条件下进行了有效模拟降雨试验共计 12 场次,每场次降雨试验的产流历时设计为 30min,固定雨强为 2.0mm/min。试验结果表明: 1)侵蚀泥沙中颗粒粒径以<2μm 粘粒和 2—20μm 细粉粒为主。在原土中,粘粒(0—2μm)和细粉粒(2—20μm)含量之和占总量的 43.92%,在泥沙中粘粒和细粉粒之和占总量的约 57.08%,均出现不同程度的增加; 2)在不同处理中,坡面土壤>1mm 干筛法团聚体含量明显大于湿筛团聚体(>1mm)的含量,可认为水稳性团聚体的含量更能作为衡量土壤结构的稳定性的指标。>0.25mm 团聚体分散度($PAD_{0.25}$)和>2mm 团聚体分散度(PAD_2)含量均出现增大,而>0.25mm 水稳性团聚体含量($WAS_{0.25}$)减少,植被覆盖度对土壤团聚体稳定性影响明显强于坡长; 3) $WAS_{0.25}$ 含量是影响侵蚀泥沙的颗粒粒径分布的主要因素,随着坡面土壤中 $WAS_{0.25}$ 的增加,侵蚀泥沙的平均重量直径逐渐降低。同时,泥沙颗粒平均直径与土壤团聚体平均重量直径($MWD_{团聚体}$)含量呈极显著负相关,可知坡面大团聚体越稳定,坡面土壤的粗化过程越不易形成。

关键词:坡长;植被覆盖度;人工模拟降雨;侵蚀泥沙;土壤团聚体

The relationship between soil aggregates and eroded sediments from sloping vegetated red soils of South China

QIAN Jing, ZHANG Liping*, WANG Wenyan
College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang University, Zhejiang Provincial Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment, Hangzhou 310058, *China*

Abstract: Soil erosion is a serious problem that has significant environmental impacts, including declines in soil quality, sedimentation of reservoirs, and nonpoint source water pollution. Thus, it is important to study soil erodibility and mechanisms for nutrient loss on sloping land. Plenty of studies have researched soil erosion factors, such as land use patterns, plant cover type and ratio, slope length and gradient, rainfall intensity and amount, and raindrop kinetic energy; these studies have been key to characterizing these processes. It is generally recognized that plant cover and slope length have a significant impact on soil erosion and nutrient loss. However, these parameters have often been studied in isolation, and few have researched the combined effects of sedimentation and nutrient loss. In this study, we analyzed the effects of slope length and plant cover ratio on the particle size distributions (PSDs) of soil and eroded sediments from sloping vegetated fields under heavy rainfall. We evaluated the change in soil aggregate stability characteristics to explain the relationship between PSDs of the eroded sediment and soil aggregate stability. Twelve simulated rainfall experiments were conducted in a glasshouse with a rainfall intensity of 2mm/min and runoff was produced within 30min. For this study, we implemented three slope lengths, 2, 3, and 4m, and four levels of vegetation cover ratios, 0, 30%, 60%, and 90%, in

基金项目:国家自然科学基金项目(41471221)
收稿日期:2016-11-11; **网络出版日期**:2017-11-21

*通讯作者 Corresponding author.E-mail: lpzhang@ zju.edu.cn; lpzhang163@ 163.com

2014 and 2015. The micropipette method was used for particle size analysis of soils and eroded sediments. Surface soil samples before and after rainfall were separated into five soil aggregate sizes, >2mm, 1—2 mm, 0.5—1mm, 0.25-0.5mm, and <0.25mm, by dry sieving and wet sieving. The experimental indexes to evaluate soil aggregate stability included water stable aggregates (WSA), mean weight diameter (MWD), and dispersion degree of soil aggregate (PAD). The results showed that clay particles (<2μm) and fine silt particles (2—20μm) were the main size fractions in eroded sediments. Surface runoff, which causes soil erosion, is a selective transport process; hence, there were more clay particles and fine silt particles in the eroded sediments (approximately 57.08%) than in the original soils (43.92%). The proportion of clay particles in the eroded sediment increased slightly as the vegetation cover ratio increased. There were no significant differences in PSDs of eroded sediments for different slope lengths with the same cover ratio ($P>0.05$). The content of >2mm and >0.25mm PAD ($PAD_{0.25}$, PAD_2) increased, whereas the content of >0.25mm WSA ($WSA_{0.25}$) decreased after rainfall. Vegetation cover ratio had a more significant effect on >0.25mm soil aggregate stability than did slope length. We found that the WSA index generally reflected the difference in soil structure stability. $WSA_{0.25}$ was the main factor affecting PSDs of eroded sediments; the MWD content of the eroded sediments decreased gradually whereas $WSA_{0.25}$ content increased. We also found a significant negative correlation between PSDs of eroded sediment and MWD of soil aggregate. Finally, we observed that more stable soil macro-aggregates resulted in less coarse soil surfaces.

Key Words: slope length; vegetation cover ratio; artificial simulated rainfall; erosion sediment; soil aggregate

由土壤侵蚀所引起的土壤退化问题，一直以来都是国内外研究者极为关切的环境问题[1-3]。土壤侵蚀主要导致土壤颗粒的粗化，土层变薄及土壤养分的流失，并最终降低土壤质量、土地生产力及土壤对环境变化的缓冲能力。特别是土壤颗粒粗化及土层变薄，它们对土壤造成的危害是通过人工措施难以得到修复的，因此在大力开展土壤退化治理，提高土壤肥力，控制土壤养分流失引起的水体富营养化方面，首先应有效的控制因土壤侵蚀所导致的土壤颗粒粗化[4]。坡面土壤粗化是指在雨滴打击作用下，土壤表面因细颗粒被溅蚀、淋滤及土壤细颗粒随径流迁移损失，而砂粒或砾石等大粒径的土壤颗粒在坡面上沉积、含量增高的现象，最终使坡面表层土壤和侵蚀泥沙颗粒的机械组成发生相应的改变[5]。

由于土壤团聚体是土壤结构的基本结构单元[6-7]，其粒径大小分布及稳定性影响降雨时雨滴的入渗、径流的运移及土壤可蚀性，最终改变侵蚀泥沙的颗粒组成[8-9]，因此认为土壤或侵蚀泥沙颗粒组成的变化可作为衡量土壤粗化程度及土壤团聚体稳性的重要指标之一[10-12]。如：陈正发[13]等在研究紫色土旱地土壤侵蚀过程中，指出土壤团聚体稳定性越差，侵蚀产沙量和径流量越大。李朝霞等[14]研究降雨过程中红壤表土结构变化与侵蚀产沙的关系中发现，一方面，由于土壤团聚体结构稳定性较差，容易破碎，另一方面，坡面径流携带泥沙的搬运过程具有明显的选择性，是随着径流量和流速的变化而变化，坡面径流量大、流速快，则所搬运的泥沙的粒径大，反之，则搬运的泥沙粒径较小（粘粒或粉粒）。因此，在土壤团聚体特征和径流特征的共同作用下，侵蚀泥沙中细颗粒物（<0.02mm）含量远高于土壤中该粒径颗粒含量。郭伟等[15]在研究南方红壤丘陵区不同破碎机制对团聚体稳定性与坡面侵蚀过程的影响中，得出随着土壤团聚体粒径的减小，侵蚀泥沙的平均直径逐渐增大的结论。闫峰陵等[16]在野外的模拟降雨试验中，认为泥沙粒径与湿筛 $MWD_{团聚体}$ 和 $WSA_{0.25}$ 之间呈显著正相关。姜义亮等[17]等在研究东北黑土区片蚀和沟蚀对土壤团聚体流失的影响中指出，表征团聚体流失的两个特征平均重量直径（MWD）和几何平均直径（GMD）均能反映黑土农耕地坡面片蚀和和沟蚀方式下的团聚体流失特征，其中 MWD 能够更好的反映出雨强变化时两种侵蚀方式下土壤团聚体的流失特征。卢嘉等[18]在降雨侵蚀过程中黑土团聚体流失特征的研究中得出秸秆覆盖试验处理下流失团聚体的平均重量直径（MWD）和几何平均直径（GMD）分别是裸露休闲处理的 1.5—2.9 和 1.7—2.0 倍；而秸秆覆盖处理下的平均重量比表面积（MWSSA）和分形维数（D）较裸露休闲处理分别减少了 26.2%—32.9% 和 5.1%—6.7% 的结论。

在我国,南方红壤丘陵区总土地面积为 $118\times10^4 km^2$,约占国土总面积的 12.3%。该地区因具有降雨充沛,暴雨强度大,地形起伏等独特的自然环境,易导致土壤淋溶,抗蚀性弱[19]等问题。特别是在浙江省,因社会经济发展迅猛,各类开发项目增多[20],使得该地区平原河谷农用地面积减少,无法满足当地的农事需求,农民逐步开始选择在山地和丘陵区坡面种植蔬菜作物。因此,以坡面菜地特殊的管理方式和影响因素为背景,开展强降雨对坡面菜地土壤及侵蚀泥沙特征变化的研究,具有十分重要的实际意义和理论价值。本研究就是在总结了以往研究成果及测试方法的基础上,设计以不同坡长、不同植被覆盖度为外部环境条件,以室内人工模拟降雨为试验方法,通过分析相关试验数据,确定强降雨过程对土壤及侵蚀泥沙颗粒组成的影响,探讨坡面土壤团聚体稳定性的变化特征,进而揭示侵蚀泥沙颗粒组成与土壤团聚体稳定性之间的内在联系。

1 试验设计与过程

1.1 试验装置和供试土壤

全部人工模拟降雨试验(采样,试验和分析测定)均在 2014 年 5 月—2015 年 2 月完成。该人工模拟降雨试验在浙江大学华家池校区玻璃温室内进行,试验温度保持在 20—25℃之间。试验小区设计以 3 种不同坡长的径流槽(2,3,4m)为 1 组,坡度均为 20°,0.5m 宽,0.5m 深,因此径流槽的面积分别为 2m×0.5m,3m×0.5m,4m×0.5m 的 3 类。人工模拟降雨的装置及试验小区整体示意图见图 1,图 2。

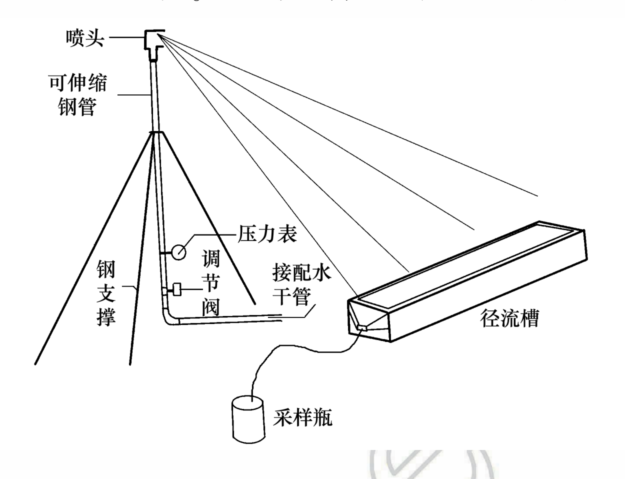


图 1 人工模拟降雨装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of simulation rainfall equipment



图 2 试验小区整体示意图

Fig.2 Schematic diagram of experimental plots

试验土壤是浙江省临安市的典型红壤,也是浙江省最为普遍的土壤类型,其来源于火成岩缓坡地风化残积母质发育的红壤。供试土壤的基本理化性质如表 1[21]。

表 1 试验小区的表层土壤(0—10cm)理化性质

Table 1 Physical-chemical characteristics of original soil

理化指标 Physicochemical parameters	数值 Value	理化指标 Physicochemical parameters	数值 Value
pH	4.5	全磷 TP/(g/kg)	0.21
土壤容重 Soil bulk density/(g/cm^3)	1.42	有机碳 SOC/(g/kg)	10.76
总氮 TN/(g/kg)	0.77	砂粒 Sand/%	25.05
硝态氮 NO_3^--N/(mg/kg)	30.8	粉粒 Silt/%	49.10
氨态氮 NH_4^+-N/(mg/kg)	7.4	粘粒 Clay/%	25.85

pH 为土水比(1:2.5)

植被的选择为在浙江省广泛种植的浙白 6 号白菜(*Brassica campestris* L)。随着白菜的不断生长,人为将试验小区的植被覆盖度划分为 0,30%,60%,90%,植被覆盖度的确定主要是通过高像素的数码相机在空中垂

直拍摄,将拍摄的影像扫描输入电脑,处理为灰色调的图片,根据灰度确定植被覆盖度。并将实测的植被覆盖度分为 4 个等级(0,30%,60%,90%),其某一级误差范围为±6%。

1.2　模拟降雨

浙江省属亚热带季风气候。该气候夏季炎热多雨,冬季低温少雨。全年降水充沛,平均雨强达到 0.65—1.95mm/min。考虑到当地的降雨特点及降雨时间,每场降雨的雨强设计为 2.0mm/min,产流历时为 30min,每场降雨的时间间隔是由试验小区的初始条件所决定,特别是小区土壤的前期含水量,尽量保持每场次降雨的环境条件一致,因此设定 14—20d 为降雨间隔时间,即当小区土壤的前期含水量恢复到第一次降雨时的水平,每次降雨都重复这一过程。试验设置为每场降雨试验 3 个坡长为 1 组,可以同时覆盖,即:植被覆盖为 0 时,3 次重复,植被覆盖为 30%时,3 次重复,植被覆盖为 60%时,3 次重复,植被覆盖为 90%时,3 次重复,共进行有效降雨场次 12 场。具体试验设计见表 2。

表 2　降雨试验设计

Table 2　The design of rainfall experiment

降雨场次 Rain number	坡长 Slope length/m	植被覆盖度 Coverage ratio/%	降雨场次 Rain number	坡长 Slope length/m	植被覆盖度 Coverage ratio/%
1	2	0	7	3	60
2	2	30	8	3	90
3	2	60	9	4	0
4	2	90	10	4	30
5	3	0	11	4	60
6	3	30	12	4	90

室内人工模拟选择的是中国科学院水土保持研究所研制生产的可移动的侧喷式小型人工模拟降雨装置(图 1),通过调节水压和喷头孔径大小,控制雨强的大小。本试验由 4 套降雨装置组成,分别安置在径流槽的两侧(一侧两套)。雨滴降落时的高度为 6m。同时在小区的边缘设计了 20 个集雨桶来监测雨强及均匀度(a),计算公式如下:

$$P = 10 \times \frac{V/S}{t} \tag{1}$$

$$a = (1 - \frac{D}{\bar{P}}) \tag{2}$$

$$D^2 = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(P - \bar{P})^2 \tag{3}$$

式中,P 为各测点的雨强, mm/min; V 为用量筒测量的每个小桶的平均雨量, mL;S 为小桶桶口的面积, cm^2; t 为测量时间,min; n 为所有测点; $\bar{P}$ 为降雨面上的平均雨强。D 是所有测点相对于其平均值的平均绝对误差,$D/\bar{P}$ 则是平均相对误差,它与 1 越接近表明各点雨强的差异越小,因此可作为反映雨强空间分布是否均匀的判断指标; a 值越大, 雨强空间的分布均匀性越好。根据公式,计算得出 12 场次降雨均匀度结果被列于表 3,如表 3 所示,在本研究中降雨均匀度均达到 90%左右。

表 3　降雨试验的平均雨强和降雨均匀度

Table 3　The average rainfall intensity and uniformity coefficient of rainfall experiment

降雨场次 Rain number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
降雨均匀度/% The coefficient of uniformity	92.31	90.90	89.37	89.37	86.76	91.34	92.61	94.29	91.37	92.48	89.97	92.43

1.3　样品收集

在降雨过程中记录初始产流时间,径流流入每个小区底部的矩形金属槽,最后从出水口流出,径流是以相

同的时间间隔(120s)被收集到1000mL的聚乙烯瓶内。收集的径流样品带回试验室,经静置4—5h后,记录径流量,然后倒出上清液,取底部的泥沙自然风干,称重和收集。

1.4 样品分析

径流小区土壤和侵蚀泥沙样品主要测定和计算分为以下10个指标:径流量(L)并计算得到径流系数(径流系数=径流量/降雨量),侵蚀泥沙质量(W_S),泥沙的颗粒组成(吸管法),坡面土壤容重(环刀法)、坡面土壤含水量、坡面土壤干筛法团聚体、湿筛法团聚体和坡面土壤的机械组成(吸管法),坡面土壤团聚体分散度($PAD_{0.25}$,PAD_2),坡面土壤湿筛团聚体平均重量直径($MWD_{团聚体}$)。

i. 土壤分散度计算公式如下(4),(5):

$$PAD_{0.25} = \frac{D_{0.25} - W_{0.25}}{D_{0.25}} \times 100\% \quad (4)$$

$$PAD_2 = \frac{D_2 - W_2}{D_2} \times 100\% \quad (5)$$

在公式(4),(5)中$PAD_{0.25}$代表>0.25mm粒径团聚体的分散度,PAD_2为>2mm粒径团聚体的分散度,$D_{0.25}$和D_2为干筛法测得的粒径分别为>0.25mm和>2mm土壤团聚体所占的质量百分比;$W_{0.25}$和W_2为湿筛法测得的粒径分别为>0.25mm和>2mm土壤团聚体所占的质量百分比。

ii.湿筛团聚体平均重量直径($MWD_{团聚体}$):$MWD = \sum_{i=1}^{n+1} \frac{r_i = 1 + r_i}{2} \times m_i$, r_i是第r个筛子直径(mm),$r_0=r_1$,$r_n=r_{n+1}$,m_i是第i个筛子的破碎团聚体重量百分比。

2 结果与讨论

2.1 降雨侵蚀泥沙颗粒机械组成变化特征

在坡面土壤中,降雨侵蚀过程主要有以下几部分:雨滴击溅使土壤团聚体破碎;雨水湿润表层土壤使团聚体崩解;径流迁移过程中携带土壤细颗粒和进一步冲刷破坏表层土壤团聚体[22-23];其中雨滴击溅和雨水湿润对土壤团聚体的破坏作用基本上是同时发生的,是土壤侵蚀的早期阶段,对其后的径流迁移及冲刷破坏土壤团聚体存在极大影响。

本文从12场有效降雨中选择了4个不同植被覆盖度(0,30%,60%,90%)条件下,2、3、4m坡面中,土壤及泥沙颗粒的机械组成的测定结果(表4),对其进行比较分析。按照中国制粒径分级标准将土壤颗粒粒径划分为4个区间:<2μm,2—20μm,20—50μm,>50μm,来指示坡面径流侵蚀和泥沙输移过程中不同粒径颗粒的变化情况。

表4结果表明:在原土中,粘粒(0—2μm)和细粉粒(2—20μm)含量之和占总量的43.92%,在泥沙中粘粒和细粉粒之和占总量的约57.08%,均出现不同程度的增加,即:泥沙<20μm的颗粒含量均比原地表土壤含量高;粗粉粒和砂粒均比原地表土壤含量低(粗粉粒和砂粒分别较原土减少了约7.83%和5.58%)。

根据以上试验结果得出如下结论:侵蚀泥沙以粒径较小的细颗粒物为主,且含量高于对应的原土。该结论与Neibling等[24]所提出的坡面侵蚀泥沙均以<30μm颗粒为主的观点一致;黄丽等[25]也认为紫色土侵蚀泥沙中存在粘粒(<2μm)的大量富集;Palis等[26]则提出降雨剥离、泥沙沉积以及径流的选择性搬运共同决定了侵蚀泥沙的粒径分布特征。

在本研究中,强降雨条件下,雨滴动能明显大于土壤颗粒内部的粘结力,这种粘结力在雨强较大时易被破坏[27],土壤团聚体破碎崩解,同时降雨过程中形成的表面径流不断冲刷土壤中泥沙颗粒,粒径较小的泥沙颗粒会随径流迁移出坡面,而大粒径的颗粒较易在坡面上移动一段距离后被沉积,使表土层颗粒粗化[28]。

目前,坡长对侵蚀产沙的影响由于涉及降雨在坡面的再分配,即受到沿坡面上下部位发生的径流量不相等的影响,因而使得这一问题变得较为复杂[29]。坡长是影响土壤侵蚀的重要因素之一,针对坡长对坡面侵蚀

的影响,各学者经过深入的研究后,所取得的结论存在很大的不同[30]。在本研究中,砂粒自身的重力以及沿坡面所产生摩擦力很快抵消了增加的径流剪切力,使得粗砂沿坡面移动一段距离之后被沉积,致使坡长对泥沙中各级粒径颗粒比例的影响不明显,在相同覆盖度下,2m 和 4m 坡面上各级粒径泥沙颗粒含量变化差异不大,未达到显著性水平(P>0.05)。

表 4　整场降雨所收集的泥沙颗粒粒径分布情况

Table 4　Particle size distribution of sediments were collected during rainfall events

植被覆盖度 Coverage ratio/%	坡长 Slope length/m	粘粒 0—2μm Clay/%	细粉粒 2—20μm Fine silt/%	粗粉粒 20—50μm Coarse silt/%	砂粒>50μm Sand/%
0	2	33.76	23.13	23.28	19.83
	3	33.50	23.40	24.33	18.77
	4	33.49	23.03	24.32	19.16
30	2	33.90	23.67	23.21	19.22
	3	30.88	23.45	34.24	11.43
	4	30.92	22.32	23.29	23.47
60	2	33.46	23.68	22.07	20.79
	3	33.59	24.75	20.52	21.14
	4	34.08	24.61	18.66	22.65
90	2	35.21	23.76	22.80	18.23
	3	35.11	23.66	23.96	17.27
	4	34.06	23.59	23.80	18.55
原土 Original soil	—	25.40	18.52	30.58	25.50

不同植被覆盖下,除(0—2μm)的粘粒含量随着植被覆盖的增加出现轻微的增大趋势以外,其他各粒径泥沙颗粒均在一定范围内波动,没有表现出较为明显的变化趋势。原因可能是:覆盖度较小时,雨滴击溅作用和径流运移的作用并没有得到明显的削弱,坡面大团聚体被剥离和分散的同时,降雨径流优先搬运粗颗粒。当植被覆盖度增加,削减了部分雨滴对土壤表面的溅蚀力,增加了降雨向土壤深层渗透;其次由于植物截留降雨量以及拦截径流能力的增强,减慢径流的流速,进一步减少了大粒径泥沙颗粒的迁移,使侵蚀泥沙中的细颗粒物比重增加。

2.2　在降雨过程中坡面土壤团聚体破碎对侵蚀泥沙粒径变化的影响

2.2.1　降雨过程中土壤团聚体破碎特征分析

在降雨击溅和径流冲刷等外力作用下,团聚体破碎后,在短时间内不会形成结皮,反而由于破碎后较小颗粒的吸水作用,在土壤水没有达到饱和时,增加了坡面土壤的渗透能力。同时,由于本试验的降水历时较短,表层土壤粘粒含量不高,推迟径流发生的趋势大于结皮的形成,结皮对坡面土壤侵蚀的影响比较微弱。因此,在本研究中,没有考虑结皮对坡面土壤团聚体破碎及侵蚀泥沙粒径变化的影响。其次,根据相关研究结论指出[31-32],60%—80%为坡面侵蚀临界植被覆盖度,当植被覆盖度>80%时,覆盖度的增加并不能引起产流、产沙量的大幅度下降,植被水沙调控作用趋于稳定,因此在本研究分析不同坡长和植被覆盖度下,坡面表层土壤(0—10cm)降雨后土壤团聚体稳定性的变化特征,选择了 2、3、4m 的 3 种坡长及 0,30%,60%的 3 种植被覆盖度条件下,共计 9 场有效降雨前和降雨后的坡面土壤样品,通过干筛法和湿筛法得到的各级团聚体的含量(降雨前和降雨后),并将结果列于表 5。

通过比较降雨前、后土壤团聚体的变化情况(表 5)发现,降雨后<0.25mm 和>2mm 干筛法团聚体数量分别较降雨前增加了约 1.22 倍和 1.03 倍,其余各个粒径团聚体数量均减少;湿筛法团聚体中,<0.25mm 团聚体则增加了约 1.08 倍,其余各粒级团聚体含量均减少,随着植被覆盖度的增加,>2mm 和<0.25mm 粒径干筛团聚体增量逐渐减少,其中<0.25mm粒径团聚体变化最为明显,如在坡长为4m,植被覆盖度为0,30%,60%时,

表 5 降雨前与降雨后表土团聚体组成特征分布/%

Table 5 Soil aggregates size distribution in the topsoil before rainfall and the after

坡长 Slope length/m	植被覆盖度 Coverage ratio/%	径流量 Runoff volume/L	泥沙量 Sediment yield/g	分析方法 Analytical methods	降雨前 Before rainfall					降雨后 After rainfall				
					>2mm	1—2mm	0.5—1mm	0.25—0.5mm	<0.25mm	>2mm	1—2mm	0.5—1mm	0.25—0.5mm	<0.25mm
2	0	40.14	122.00	干筛法	53.35	15.63	14.29	9.69	7.03	56.54	13.99	13.31	7.83	8.33
				湿筛法	19.45	6.19	6.56	10.08	57.72	19.07	4.48	5.91	6.18	64.36
	30	30.49	66.10	干筛法	55.42	15.25	14.21	6.63	8.49	58.25	13.01	13.17	5.79	9.78
				湿筛法	19.44	5.28	6.01	5.59	63.68	19.55	4.07	4.32	3.88	68.18
	60	24.34	38.93	干筛法	57.39	13.21	11.43	8.50	9.47	59.21	11.07	10.32	8.12	11.28
				湿筛法	20.11	4.17	4.37	3.76	67.59	20.09	3.88	3.21	3.13	69.69
3	0	60.13	127.49	干筛法	64.14	11.13	9.44	6.54	8.75	67.11	9.16	7.21	5.76	11.06
				湿筛法	22.45	10.53	7.63	5.66	53.73	21.51	8.16	5.18	4.30	60.85
	30	46.96	67.99	干筛法	67.94	9.10	7.45	4.74	10.77	69.13	7.91	5.13	3.97	13.86
				湿筛法	23.10	7.55	5.42	4.11	59.82	22.28	6.21	3.69	3.10	64.72
	60	38.27	41.12	干筛法	70.21	7.52	5.47	3.69	13.11	72.26	5.89	3.91	3.15	14.79
				湿筛法	24.14	5.21	4.32	3.84	62.49	23.87	4.82	3.19	3.23	64.89
4	0	73.08	371.60	干筛法	63.22	13.22	9.54	7.28	6.74	66.64	11.22	7.87	5.47	8.80
				湿筛法	21.28	10.53	7.38	6.42	54.39	20.56	8.19	5.71	3.86	61.68
	30	56.23	229.89	干筛法	66.12	11.11	7.56	6.22	8.99	67.01	9.86	5.91	5.88	11.34
				湿筛法	20.78	9.34	7.17	5.88	56.83	19.78	7.62	6.17	4.50	61.93
	60	42.35	139.51	干筛法	67.31	8.42	7.10	5.81	11.36	67.93	7.02	6.63	5.18	13.24
				湿筛法	21.97	8.38	6.61	5.22	57.82	19.98	7.84	6.38	5.18	60.62

其数量分别增加了 26.88%,20.77%和 16.55%,植被覆盖度变化对<0.25mm 湿筛法团聚体的增量作用也较为明显。说明植被覆盖度对土壤团聚体的变化特征有着较为显著的影响,主要通过改变降雨时雨滴的溅蚀作用及径流冲刷作用影响土壤中不同粒径团聚体的含量。

同时,从表 5 可看出,在不同处理中,>1mm 干筛法团聚体含量明显大于对应的湿筛团聚体(>1mm)的含量,可能原因是干筛团聚体包括水稳性与非水稳性团聚体,湿筛过程中非水稳性大团聚体破碎分解成粒径小的团聚体,因此水稳性团聚体(湿筛法团聚体)的含量更能作为衡量土壤结构的稳定性的指标[33]。

2.2.2 坡长和植被覆盖度与坡面土壤团聚体破碎特征的关系性分析

评价土壤团聚体稳定性主要采用 $WAS_{0.25}$(>0.25mm 水稳性团聚体含量),PAD_2(>2mm 团聚体分散度)以及 $PAD_{0.25}$(>0.25mm 团聚体分散度)3 个指标来衡量。$WAS_{0.25}$ 含量的高低体现了土壤抗径流侵蚀能力的强弱,当 $WAS_{0.25}$ 含量越高说明土壤抗侵蚀能力越强;基于干筛和湿筛条件下团聚体颗粒分散度 PAD,主要描述土壤团聚体在降雨过程中受雨水机械破坏而导致的分散程度的大小,分散度 PAD 越小,说明团聚体稳定性越强,土壤结构越稳定,越不易受雨滴和径流分散的影响。

根据公式(4),(5)计算降雨后不同坡长和植被覆盖度下,表土(0—10cm)土壤团聚体稳定性指标,并将结果表现在表 6。通过试验结果分析看到:$PAD_{0.25}$ 和 PAD_2 在降雨后均出现了增大的趋势,其中 $PAD_{0.25}$ 比 PAD_2 增大的趋势更为明显,$WAS_{0.25}$ 在降雨后均减少,说明降雨过程中雨滴的击溅作用及径流的冲刷作用均对坡面的大团聚体结构产生一定程度的破坏,降低了坡面土壤的抗蚀性。

表 6 降雨前和降雨后表土团聚体稳定性特征参数的比较

Table 6 Comparison of soil aggregates stability index in the topsoil before rainfall and the after

坡长 Slope length/m	植被覆盖度 Coverage ratio/%	降雨前团聚体稳定性 Soil aggregates stability index in topsoil before rainfall			降雨后团聚体稳定性 Soil aggregates stability index in topsoil after rainfall		
		$WAS_{0.25}$	PAD_2	$PAD_{0.25}$	$WAS_{0.25}$	PAD_2	$PAD_{0.25}$
2	0	42.28	63.54	54.52	35.64	66.27	61.12
	30	36.32	64.92	60.31	31.82	66.44	64.73
	60	32.41	64.96	64.20	30.31	66.07	65.84
3	0	46.27	64.99	49.30	39.15	67.95	55.98
	30	40.18	66.00	54.97	35.28	67.77	59.04
	60	37.51	65.62	56.83	35.11	66.97	58.80
4	0	45.61	66.34	51.10	38.32	69.15	57.98
	30	43.17	68.57	52.57	38.07	70.48	57.06
	60	42.18	67.36	52.41	39.38	70.59	54.61

$WAS_{0.25}$:>0.25mm 水稳性团聚体含量/>0.25mm soil water stable aggregate content;PAD_2:>2mm 粒径团聚体的分散度/the degree of >2mm aggregate dispersibility;$PAD_{0.25}$:>0.25mm 粒径团聚体的分散度/the degree of >0.25mm aggregate dispersibility

$WAS_{0.25}$ 为湿筛法测得的粒径>0.25mm 土壤团聚体所占的含量百分比,PAD_2 为>2mm 粒径团聚体的分散度,$PAD_{0.25}$ 为>0.25mm 粒径团聚体的分散度。

同时,为了进一步了解坡长和植被覆盖度对坡面土壤团聚体结构稳定性的影响,将在降雨前和降雨后 $WAS_{0.25}$,PAD_2,$PAD_{0.25}$ 的增量(或减量)与坡长和植被覆盖度之间的关系进行相关性分析,并将结果呈现于表 7。如表所述,植被覆盖度对土壤团聚体稳定性影响明显大于坡长,其中植被覆盖度对 $WAS_{0.25}$ 及 $PAD_{0.25}$ 分别呈极显著的正相关和负相关关系,因此可知,植被覆盖度的变化主要通过影响>0.25mm 团聚体的含量来作用于表层土壤结构,坡长对土壤团聚体稳定性影响均不显著。可能原因是植被覆盖度增加,一定程度上减缓雨水对土壤的击打,降低径流的流速,削弱径流对表面土壤的剪切,再加之植物根系疏导作用可使雨水更易向土壤深层渗透,分流一部分水流。同时,植物根系的挤压和缠绕,提高了土壤团聚体稳定性,使得土壤抗侵蚀能力逐步增强[34]。

表 7 降雨过程中表土团聚体稳定性变化与坡长及植被覆盖度的相关分析

Table 7 Correlation analysis among soil aggregates stability index, slope length and coverage ratio

土壤团聚体稳定性指标 Soil aggregate stability index	坡长 Slope length/m	植被覆盖度 Coverage ratio/%	坡长与植被覆盖度共同作用 The combined effect of Slope length and Coverage ratio
PAD_2的增量 Increment of PAD_2	0.477	-0.517	-0.214
$PAD_{0.25}$的增量 Increment of $PAD_{0.25}$	0.084	-0.994 **	-0.884 **
$WAS_{0.25}$的减量 Reduction of $WAS_{0.25}$	0.149	0.997 **	0.851 **

* 为 $P<0.05$(显著), ** 为 $P<0.01$(极显著)

2.3 土壤团聚体稳定性与土壤、侵蚀泥沙颗粒组成之间的关系

在降雨径流所引起的土壤侵蚀中,径流动能的选择性侵蚀和搬运,使得粒径较小的泥沙颗粒先起动进入径流,且随径流搬运距离较远,而粗颗粒在坡面沉积,引起了坡面土壤的粗化。在坡面侵蚀过程中,径流强度大时,可携带泥沙量多,被搬运的泥沙粒径也大;反之径流强度较小时,可携带泥沙量少,侵蚀泥沙粒径较小。之前曾有学者就土壤团聚体稳定性与土壤侵蚀之间的关系进行相关的研究,如:闫峰陵等[35]曾指出了在野外尺度上,红壤团聚体稳定性是影响坡面侵蚀的重要因素;土壤可蚀性的团聚体特征参数 *Ka*,与径流强度、产沙强度等侵蚀参数显著相关。坡面土壤团聚体稳定性和坡面径流强度大小共同决定了坡面土壤和侵蚀泥沙机械组成,因此本文将团聚体稳定性、径流系数对坡面土壤和侵蚀泥沙平均直径之间进行相关分析,并将结果呈现于表 8。

如表 8 所示,$MWD_{团聚体}$、$WAS_{0.25}$,径流系数与泥沙平均重量直径存在极显著负相关关系;同时,泥沙平均重量直径与 $PAD_{0.25}$ 呈极显著的正相关,而 PAD_2 和泥沙粒径之间不相关,由此可知,>0.25mm 水稳定性团聚体含量是影响侵蚀泥沙的颗粒粒径分布的主要因素,随着坡面土壤中>0.25mm 水稳定性团聚体含量的增加,侵蚀泥沙中平均重量直径逐渐降低。土壤颗粒平均直径与 $MWD_{团聚体}$ 呈极显著负相关,可知坡面大团聚体越稳定,粗化过程不易形成。

表 8 土壤团聚体稳定性参数与土壤、泥沙颗粒平均粒径之间的关系

Table 8 Correlation analysis among soil aggregates stability index, average diameters of soil and eroded sediment

侵蚀泥沙平均直径 Average diameter of eroded sediment	$MWD_{团聚体}$	$PAD_{0.25}$	PAD_2	$WAS_{0.25}$	径流系数 Runoff coefficient
相关系数 Correlation coefficent	-0.822 **	0.830 **	0.252	-0.898 **	-0.938 **
显著性概率 Significance probability	0.007	0.006	0.513	0.001	0.000
坡面土壤颗粒平均直径 Average diameter of soil particles in topsoil	**$MWD_{团聚体}$**	**$PAD_{0.25}$**	**PAD_2**	**$WAS_{0.25}$**	**径流系数 Runoff coefficient**
相关系数 Correlation coefficent	-0.802 **	-0.646	-0.208	0.638	-0.627
显著性概率 Significance probability	0.009	0.060	0.591	0.064	0.071

* 为 $P<0.05$(显著), ** 为 $P<0.01$(极显著);$MWD_{团聚体}$:土壤团聚体平均重量直径/Mean weight diameter of soil aggregate

3 结论

本文在不同坡长和植被覆盖度的试验条件下,研究强降雨过程中坡面土壤团聚体稳定性及坡面侵蚀泥沙颗粒组成的变化特征,同时,进一步分析坡面土壤团聚体稳定性与侵蚀泥沙颗粒组成之间的相互联系。得出如下结论:

1)试验结果表明粘粒(0—2μm)和细粉粒(2—20μm)总含量均出现不同程度的增加(约占侵蚀泥沙总量的 57.08%),因此可认为侵蚀泥沙以粒径<20μm 的细颗粒物为主,该结论与其他相关的研究结果一致。同时,本研究结果表明坡长对泥沙颗粒组成的影响不明显($P>0.05$);不同植被覆盖下,仅粘粒(0—2μm)含量随着植被覆盖度的增加而增大,其他各粒径泥沙颗粒均无明显变化趋势。

2)通过对降雨前、后土壤团聚体的变化情况进行比较后发现,<0.25mm 干筛法和湿筛法团聚体的含量均出现不同程度的增加。其中,植被覆盖度对土壤团聚体的变化特征影响较为明显。在土壤团聚体稳定性参数($WAS_{0.25}$,PAD_2,$PAD_{0.25}$)与试验变量(坡长和植被覆盖度)之间的相关性分析结果指出,植被覆盖度对土壤团聚体稳定性影响明显大于坡长。

3)在土壤团聚体稳定性与土壤、侵蚀泥沙颗粒组成之间的分析中,得出结论植被覆盖度是通过影响$WAS_{0.25}$的含量而作用于表土结构的稳定性。同时,试验结果也表明,$WAS_{0.25}$含量是影响侵蚀泥沙的颗粒粒径分布的主要因素,坡面土壤大团聚体越稳定,坡面土壤粗化过程越不易形成。

参考文献(References):

[1] 程冬兵, 蔡崇法, 左长清. 土壤侵蚀退化研究. 水土保持研究, 2006, 13(5): 252-254.
[2] 赵其国, 黄国勤, 马艳芹. 中国南方红壤生态系统面临的问题及对策. 生态学报, 2013, 33(24): 7615-7622.
[3] 刘占锋, 傅伯杰, 刘国华, 朱永官. 土壤质量与土壤质量指标及其评价. 生态学报, 2006, 26(3): 901-913.
[4] 张燕, 彭补拙, 高翔, 杨浩. 侵蚀引起的苏南坡地土壤退化. 农业环境科学学报, 2005, 24(1): 113-117.
[5] 王军光, 李朝霞, 蔡崇法, 王玉华, 张国彪, 马仁明. 坡面流水力学参数对团聚体剥蚀程度的定量影响. 水科学进展, 2012, 23(4): 502-508.
[6] 向艳文, 郑圣先, 廖育林, 鲁艳红, 谢坚, 聂军. 长期施肥对红壤水稻土水稳性团聚体有机碳、氮分布与储量的影响. 中国农业科学, 2009, 42(7): 2415-2424.
[7] 王清奎, 汪思龙. 土壤团聚体形成与稳定机制及影响因素. 土壤通报, 2005, 36(3): 415-421.
[8] 胡霞, 蔡强国, 刘连友, 蔡崇法, 李顺江, 朱远达. 人工降雨条件下几种土壤结皮发育特征. 土壤学报, 2005, 42(3): 504-507.
[9] Dimoyiannis D, Valmis S, Danalatos N G. Interrill erosion on cultivated Greek soils: modelling sediment delivery. Earth Surface Processes and Landforms, 2006, 31(8): 940-949.
[10] Bajracharya R M, Lal R. Seasonal soil loss and erodibility variation on a Miamian silt loam soil. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56(5): 1560-1565.
[11] 宋阳, 刘连友, 严平, 曹彤. 土壤可蚀性研究述评. 干旱区地理, 2006, 29(1): 124-131.
[12] 王彬, 郑粉莉, Römkens M J M. 水蚀过程的土壤可蚀性研究述评. 水土保持研究, 2013, 20(1): 277-286.
[13] 陈正发, 史东梅, 谢均强, 张兵. 紫色土旱坡地土壤团聚体稳定性特征对侵蚀过程的影响. 中国农业科学, 2011, 44(13): 2721-2729.
[14] 李朝霞, 王天巍, 史志华, 丁树文, 蔡崇法. 降雨过程中红壤表土结构变化与侵蚀产沙关系. 水土保持学报, 2005, 19(1): 1-4.
[15] 郭伟, 史志华, 陈利顶, 李朝霞, 闫峰陵, 蔡崇法. 红壤表土团聚体粒径对坡面侵蚀过程的影响. 生态学报. 2007, 27(6): 2516-2522.
[16] 闫峰陵, 史志华, 蔡崇法, 李朝霞. 红壤表土团聚体稳定性对坡面侵蚀的影响. 土壤学报, 2007, 44(4): 577-583.
[17] 姜义亮,郑粉莉,王彬,温磊磊,沈海鸥,易祎.东北黑土区片蚀和沟蚀对土壤团聚体流失的影响.生态学报,2013,24(33):7774-7781.
[18] 卢嘉,郑粉莉,安娟,李桂芳.降雨侵蚀过程中黑土团集体流失特征,生态学报,2016,8(36):2264-2273.
[19] 郑华, 欧阳志云, 王效科, 苗鸿, 赵同谦, 彭廷柏. 不同森林恢复类型对南方红壤侵蚀区土壤质量的影响. 生态学报, 2004, 24(9): 1994-2002.
[20] 梁音, 杨轩, 潘贤章, 张斌, 史德明. 南方红壤丘陵区水土流失特点及防治对策. 中国水土保持, 2008, (12): 50-53.
[21] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版). 北京: 中国农业出版社, 2005: 1-495.
[22] Zhang F L, Merrill S D, Huang C H, Tanaka D L, Darboux F, Liebig M A, Halvorson A D. Runoff, soil erosion and erodibility of conservation reserve program land under crop and hay production. Soil Science Society of America Journal, 2004, 68(4): 1332-1341.
[23] 卢嘉, 郑粉莉, 安娟, 李桂芳. 降雨侵蚀过程中黑土团聚体流失特征. 生态学报, 2016, 36(8): 2264-2273.
[24] Neibling W H, Moldenhauer W C, Holmes B M. Evaluation and comparison of two methods for characterization of sediment size distribution. Transactions of the ASAE, 1983, 26(2): 0472-0480.
[25] 黄丽, 丁树文, 董舟, 蔡强国, 张光远. 三峡库区紫色土养分流失的试验研究. 水土保持学报, 1998(1): 8-13, 21-21.
[26] Palis R G, Okwach G, Rose C W, Saffigna P G. Soil erosion processes and nutrient loss: 1. The interpretation of enrichment ratio and nitrogen loss in runoff sediment. Australian Journal of Soil Research, 1990, 28(4): 623-639.
[27] Martinez-Mena M, Castillo V, Albaladejo J. Relations between interrill erosion processes and sediment particle size distribution in a semiarid Mediterranean area of SE of Spain. Geomorphology, 2002, 45(3/4): 261-275.
[28] 吴凤至, 史志华, 岳本江, 王玲. 坡面侵蚀过程中泥沙颗粒特性研究. 土壤学报, 2012, 49(6): 1235-1240.
[29] 刘纪根, 雷廷武, 蔡国强. 施加聚丙烯酰胺后坡长对侵蚀产沙过程的影响. 水利学报, 2004,35(1): 57-61.
[30] 孔亚平, 张科利, 曹龙熹. 土壤侵蚀研究中的坡长因子评价问题. 水土保持研究, 2008, 15(4): 43-47.
[31] 朱冰冰, 李占斌, 李鹏, 游珍. 草本植被覆盖对坡面降雨径流侵蚀影响的试验研究. 土壤学报, 2010, 47(3): 401-407.
[32] 刘纪根, 张昕川, 李力, 黄旭华, 徐灿. 紫色土坡面植被覆盖度对水土流失影响研究. 水土保持研究, 2015, 22(3): 16-20, 27-27.
[33] 陈山, 杨峰, 林杉, 柳淑蓉, 汤水荣, 蔡崇法, 胡荣桂. 土地利用方式对红壤团聚体稳定性的影响. 水土保持学报, 2012, 26(5): 211-216.
[34] 彭新华, 张斌, 赵其国. 红壤侵蚀裸地植被恢复及土壤有机碳对团聚体稳定性的影响. 生态学报, 2003, 23(10): 2176-2183.
[35] 闫峰陵, 李朝霞, 史志华, 蔡崇法. 红壤团聚体特征与坡面侵蚀定量关系. 农业工程学报, 2009, 25(3): 37-41.